

ОПТИМИЗАЦИЯ НАСТРОЕК АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ДИФФЕРЕНЦИАТОРОМ

АННОТАЦИЯ

Решается задача поиска оптимальных значений настроечных параметров в двухконтурной АСР с дифференциатором численным методом деформируемого многогранника Нелдера-Мида. Приводятся результаты анализа некоторых известных методов расчета настроечных параметров таких систем, которые в предлагаемом алгоритме принимаются за исходные.

1. ВВЕДЕНИЕ

При автоматизации технологических процессов в теплоэнергетике широкое распространение нашли автоматические системы регулирования с добавочными переменными состояния объекта, получившие название многоконтурных.

На практике обычно ограничиваются двумя контурами. Методы расчета двухконтурных АСР достаточно подробно изложены в известных монографиях [1,2,4]. Под двухконтурными понимают каскадные АСР с корректирующим $W_{кр}(p)$ и стабилизирующим $W_{сп}(p)$ регуляторами и АСР с регулятором и дифференциатором $W_d(p)$, которая приводится к эквивалентной каскадной.

Эквивалентный корректирующий регулятор имеет передаточную функцию, обратную передаточной функции дифференциатора $W_p(p)$ $W_{кр.э}(p) = 1/W_d(p)$. При реализации дифференциатора в виде реального дифференцирующего звена получаем ПИ-регулятор с настроечными параметрами

$$k_p^д = \frac{1}{k_d}; \quad k_i^д = \frac{1}{k_d \cdot T_d}; \quad T_i^д = T_d. \quad (1)$$

Передаточная функция эквивалентного стабилизирующего регулятора определяется произведением

$$W_{сп.э}(p) = W_p(p) \cdot W_d(p). \quad (2)$$

Если регулятор в АСР с дифференциатором реализован по ПИ-закону, то для эквивалентного стабилизирующего регулятора получим передаточную функцию регулирующего устройства, имеющего четыре параметра настройки k_d , T_d , k_p^p и k_i^p или

T_i^p :

$$W_{сп.и}(p) = k_i^p \cdot k_d \cdot \frac{T_d}{T_i^p} \cdot \frac{T_i^p \cdot p + 1}{T_d \cdot p + 1}. \quad (3)$$

Если передаточную функцию (3) привести к виду типового интегродифференцирующего звена

$$W_{илз}(p) = k \cdot \frac{T_v \cdot p + 1}{T \cdot p + 1}, \quad (4)$$

то значения его коэффициентов могут быть выражены через настроечные параметры:

$$k = k_d \cdot k_p^p \cdot \frac{T_d}{T_i^p}, \quad T_v = T_i^p, \quad T = T_d.$$

При $p \rightarrow \infty$ ($t=0$), $\mu(0) = k_d \cdot k_p^p$; при $p \rightarrow 0$ ($t \rightarrow \infty$), $\mu(t) = k_d \cdot k_p^p \cdot \frac{T_d}{T_i^p}$. (5)

Далее в численном примере будет показано, как меняется характер переходных характеристик дифференциатора и регулятора, а также эквивалентного корректирующего и эквивалентного стабилизирующего регуляторов при различных настройках.

2. ОСОБЕННОСТИ АНАЛИТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ АСР С ДИФФЕРЕНЦИАТОРОМ

При малой инерционности вспомогательного канала $W_{\mu z}(p)$ порядок настройки каскадных АСР и АСР с дифференциатором в целом совпадает.

Корректирующий регулятор $W_{кр}(p)$ в каскадной АСР и дифференциатор $W_d(p)$ рассчитываются на заданный запас устойчивости по отношению передаточных функций основного и вспомогательного каналов $W_{\mu y}(p)/W_{\mu z}(p)$. Такой подход является вполне оправданным при малой инерционности вспомогательного канала (существенное различие рабочих частот внутреннего и внешнего контуров).

Стабилизирующий регулятор в каскадной АСР и регулятор в АСР с дифференциатором рассчитываются по эквивалентным объектам, соответственно:

$$\begin{aligned} W_{\text{э.ср}}(p) &= W_{\mu z}(p) + W_{\mu y}(p) \cdot W_{кр}(p) , \\ W_{\text{э.д}}(p) &= W_{\mu y}(p) + W_{\mu z}(p) \cdot W_d(p) . \end{aligned} \quad (6)$$

Если инерционность вспомогательного канала соизмерима с инерционностью основного, рекомендуется итерационная процедура с уточнением настроек по эквивалентным объектам [3].

Однако, следует заметить, если для корректирующего регулятора в эквивалентный объект при выполнении итераций входит лишь передаточная функция стабилизирующего регулятора $W_{ср}(p)$, то передаточная функция эквивалентного объекта для уточнения настроек дифференциатора содержит кроме передаточной функции регулятора $W_p(p)$ ещё и передаточную функцию самого дифференциатора $W_d(p)$. В связи с этим, в итерационной процедуре приходится использовать его же параметры, взятые на предыдущем шаге.

$$\begin{aligned} W_{\text{э.кр}}(p) &= \frac{W_{\mu y}(p) \cdot W_{ср}(p)}{1 + W_{\mu z}(p) \cdot W_{ср}(p)} , \\ W_{\text{э.д}}(p) &= \frac{W_{\mu y}(p) \cdot W_p(p) \cdot W_d(p)}{1 + W_{\mu z}(p) \cdot W_p(p) \cdot W_d(p)} . \end{aligned} \quad (7)$$

Такая двойная итерационная процедура сказывается на её сходимости, что заметно усложняет решение задачи. С учетом отмеченного, расчет оптимальной настройки регулятора и дифференциатора следует проводить совместно в пространстве четырех варьируемых величин k_d , T_d , k_p^p и k_i^p [2]. На практике такой расчет может быть произведен численными методами пошаговой оптимизации выбранной целевой функции, зависящей от настроечных параметров системы.

3. ОПТИМИЗАЦИЯ НАСТРОЕЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ АСР С ДИФФЕРЕНЦИАТОРОМ

Авторы при решении поставленной задачи использовали симплекс-метод деформируемого многогранника Нелдера-Мида с введением ограничения на запас устойчивости по основной регулируемой величине $y(t)$.

Известно, что для оценки качества регулирования в случае ступенчатого входного воздействия используют интегральные критерии, учитывающие площадь, ограниченную переходным процессом. К их числу относятся линейный интеграл $I_{л,y} = \int y(t) dt$ и интеграл по модулю $I_{м,y} = \int |y(t)| dt$.

Первый легко вычисляется непосредственно по комплексным частотным характеристикам АСР, но искажает результат при отрицательных отклонениях регулируемой величины от заданного значения и обычно применяется для слабоколебательных процессов.

В случае ПИ-регулятора, такой интеграл при заданном запасе устойчивости имеет минимальное значение при $k_{и} = (k_{р}/T_{и})_{\max}$, что и используется в аналитических методах расчета.

Поверхность отклика целевой функции, в основе которой лежит интеграл по модулю $I_{м,у}$, имеет наиболее предсказуемый характер с точки зрения применения численных поисковых процедур [5].

В целом, интегральные критерии удобны при имитационном моделировании во временной области, поскольку могут быть вычислены одновременно с точками переходного процесса. Значения интегралов $I_{л,у}$ и $I_{м,у}$ для одного и того же состояния настраиваемой системы в общем случае не одинаковы, хотя оба отражают тенденцию стремления к минимуму и могут быть использованы в качестве целевой функции в задаче оптимизации настроек.

В алгоритме деформируемого многогранника, далее АДМ, авторы использовали целевую функцию вида:

$$F(p_i) = I_{м,у}(p_i) \cdot (1 + a \cdot |\psi_{у,з} - \psi_{у}|) \quad (8)$$

где $I_{м,у}(p_i)$ - интеграл по модулю, определяемый вектором настроечных параметров $p(k_{р}^p, k_{и}^p, k_{д}, T_{д})$; $\psi_{у}$ - степень затухания регулируемого параметра $y(t)$; $\psi_{у,з}$ - заданная величина степени затухания, определяющая запас устойчивости настраиваемой системы; a - масштабный коэффициент, учитывающий вес "штрафной функции", используемой в качестве ограничения на запас устойчивости.

Вариации параметров настройки для построения исходного симплекса в расчетном примере приняты 10 % от исходных значений, коэффициент отражения $\alpha=1$, коэффициент растяжения $\gamma=2.7$, коэффициент сжатия $\beta=0.5$, условие выхода из цикла на j -ом шаге

$$|F_j(p_i) - F_{j-1}(p_i)| / F_j(p_i) \leq 0.001 \quad .$$

С учетом изложенного, для оптимизации настроек АСР с дифференциатором по АДМ рекомендуется следующая вычислительная процедура:

1. Определяется исходная точка с настроечными параметрами дифференциатора $k_{д}, T_{д}$ по $W_{\mu y}(p) / W_{\mu z}(p)$ и регулятора $k_{р}^p, k_{и}^p$ по $W_{\mu y}(p) + W_{\mu z}(p) \cdot W_{д}(p)$;
2. Проводится анализ переходных процессов по параметрам $y(t)$ и $z(t)$ с оценкой интегральных критериев $I_{л,у}$ и $I_{м,у}$, а также степеней затухания $\psi_{у}$ и $\psi_{з}$;
3. Реализуется процедура АДМ для определения оптимальных в смысле принятого критерия качества и заданного запаса устойчивости настроек $k_{р}^p, k_{и}^p, k_{а}$ и $T_{д}$;
4. Осуществляется сравнительный анализ показателей качества и запаса устойчивости для исходной и оптимальной точек. По результатам анализа делаются выводы и рекомендации по настройке исследуемой системы.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ АСР ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРГРЕТОГО ПАРА КОТЛА БМ-35-РФ

Результаты вычислений по предлагаемому АДМ и расчеты исходных настроек дифференциатора $W_{д}(p)$ и регулятора $W_{р}(p)$ с последующим применением итерационной процедуры по передаточным функциям эквивалентных объектов иллюстрируется на примере исследования АСР температуры перегретого пара котла БМ-35-РФ с поверхностным охладителем (котел №2 ТЭЦ МЭИ) [3].

Динамика основного $y(t)$ и вспомогательного $z(t)$ каналов перегревателя представлена передаточными функциями вида:

$$W_{\mu y}(p) = 0.08 \cdot \frac{e^{-23 \cdot p}}{(54.7 \cdot p + 1) \cdot (9.1 \cdot p + 1)}, \quad (9)$$

$$W_{\mu z}(p) = 0.1 \cdot \frac{e^{-10 \cdot p}}{(48.9 \cdot p + 1) \cdot (11.5 \cdot p + 1)}.$$

На рис.1 показаны линии заданного запаса устойчивости ($m=0.366$) в плоскостях настроечных параметров для дифференциатора и регулятора при исходной настройке дифференциатора по отношению передаточных функций $W_{\mu y}(p)/W_{\mu z}(p)$ и тенденция их изменения при итерационной настройке до выполнения условия сходимости.

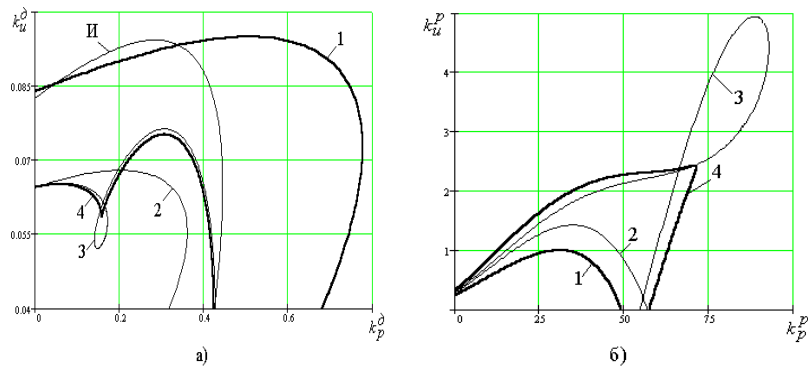


Рис.1. Линии заданного запаса устойчивости ($m=0.366$)

а) – для дифференциатора (и – исходная настройка по $W_{\mu y}(p)/W_{\mu z}(p)$; 1, 2, 3, 4 – соответственно, на 1-м, 15-м, 18-м и заключительном шагах итерационной настройки);

б)- для регулятора (1, 2, 3, 4 – соответственно, на 1-м, 15-м, 18-м и заключительном шагах итерационной настройки)

При этом было замечено, что на заключительном этапе в области низких частот (положительные значения настроечных параметров) линии принимают петлеобразный характер с самопересечением. Сходимость итерационной настройки обеспечивается при параметрах, соответствующих точкам самопересечения, которые на последнем шаге трансформируются в пики (линии 4, рис. 1).

Общий вид линий заданного запаса устойчивости ($m=0.366$) в расчетном диапазоне частот показан на рис.2.

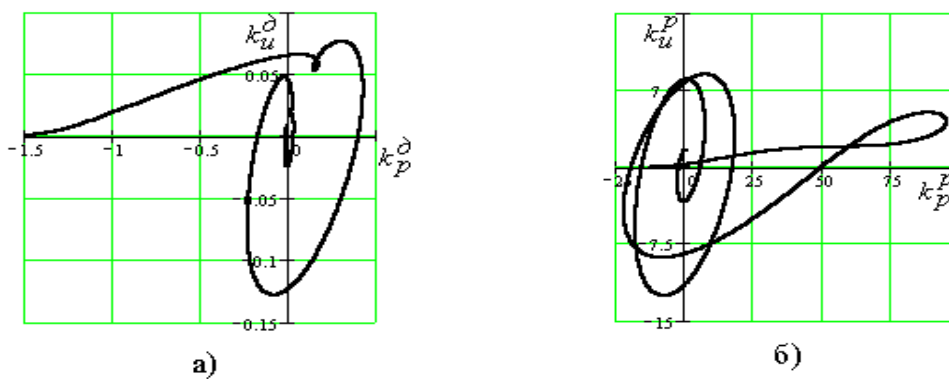


Рис.2. Общий вид линии заданного запаса устойчивости ($m=0.366$)
а) – для дифференциатора; б)- для регулятора

В работе [3] рассмотрена итерационная процедура настроек дифференциатора и регулятора, в соответствии с которой исходные значения параметров k_d и T_d определяются исходя из предпосылки, что преобразователь вспомогательного сигнала $z(t)$, реализованный в виде реального дифференцирующего звена, рассматривается как корректор, улучшающий характеристики объекта регулирования в одноконтурной АСР. После этого параметры уточняются из условия оптимальной коррекции. Показано, что такая процедура сходится

практически в одну и ту же точку с параметрами $k_d=1,069$, $T_d=9,327$ из различных исходных состояний. Итерационная настройка по эквивалентным объектам, выполненная из этой точки, приводит в область настроек, полученных по АДМ и способом итераций из других исходных состояний.

Результаты проведенных расчетов с оценкой качества регулирования и запаса устойчивости представлены в табл. 1.

На рис.3 показаны линии заданного запаса устойчивости на заключительном шаге итерационной настройки при различных исходных параметрах дифференциатора.

Таблица 1.

Шаг	$W_p(p)$		$W_d(p)$		$I_{м.у}$	$I_{л.у}$	Ψ_y	Ψ_z
	k_p^p	$k_{и}^p$	k_d	T_d				
Исходные настройки дифференциатора по $W_{\mu y}(p)/W_{\mu z}(p)$								
ИСХ	---	---	3.51	3.00	1.498	1.001	0.908	0.914
1	31.45	1.00	2.00	5.29	1.565	0.999	0.880	0.886
15	34.84	1.43	4.85	3.03	0.962	0.698	0.948	0.957
18	66.64	2.35	6.10	2.65	0.444	0.425	0.872	0.888
ЗАКЛ	71.12	2.41	6.29	2.71	0.427	0.412	0.772	0.788
АДМ	76.11	3.26	9.16	1.78	0.338	0.306	0.900	0.914
Исходные настройки дифференциатора $k_d=1.069$, $T_d=9.327$ [3]								
ИСХ	---	---	1.069	9.327	2.194	1.351	0.904	0.906
1	21.29	0.74	1.02	10.1	2.181	1.351	0.901	0.904
12	27.90	1.15	3.18	4.50	1.249	0.869	0.946	0.952
18	62.29	2.84	7.04	2.41	0.424	0.352	0.896	0.914
ЗАКЛ	66.73	3.04	7.09	2.48	0.419	0.329	0.802	0.823
АДМ	81.32	3.45	9.21	1.72	0.336	0.289	0.900	0.915
Исходные настройки дифференциатора $k_d=1$, $T_d=20$ [3]								
ИСХ	---	---	1	20.0	2.319	1.723	0.916	0.921
1	12.90	0.58	1.56	11.8	2.060	1.761	0.981	0.989
3	20.06	1.04	3.57	4.91	1.341	0.964	0.973	0.977
ЗАКЛ	76.17	2.68	6.14	2.72	0.428	0.373	0.740	0.759
АДМ	80.84	3.23	9.01	1.75	0.336	0.309	0.900	0.911
Усредненные настройки по АДМ								
	79.42	3.31	9.13	1.75	0.336	0.302	0.900	0.915
Усредненные настройки по итерационной процедуре								
	71.34	2.71	6.51	2.64	0.420	0.369	0.769	0.788
Параметры одноконтурной АСР с ПИ-регулятором								
	15.28	0.386	---	---	3.997	2.585	0.92	0.91

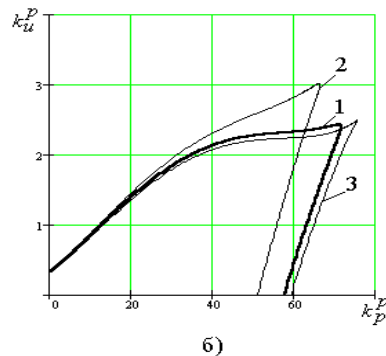
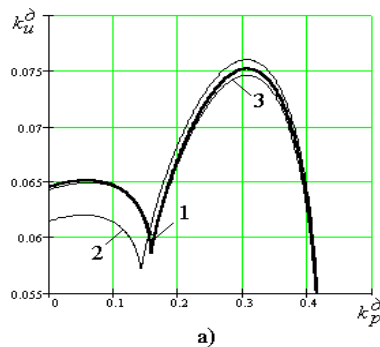


Рис. 3. Линии заданного запаса устойчивости ($m=0,366$)

а) - для дифференциатора; б) -для регулятора; 1 – исходная настройка дифференциатора по $W_{\mu y}(p)/W_{\mu z}(p)$; 2 – исходная настройка дифференциатора $k_d = 1.069$, $T_d = 9.327$ [3]; 3 – исходная настройка дифференциатора $k_d = 1$, $T_d = 20$ [3]

Общий вид переходных процессов в АСР с дифференциатором при различных настройках представлен на рис.4. Полученные при этом численные значения интегральных критериев и показателей запаса устойчивости приведены в табл.1.

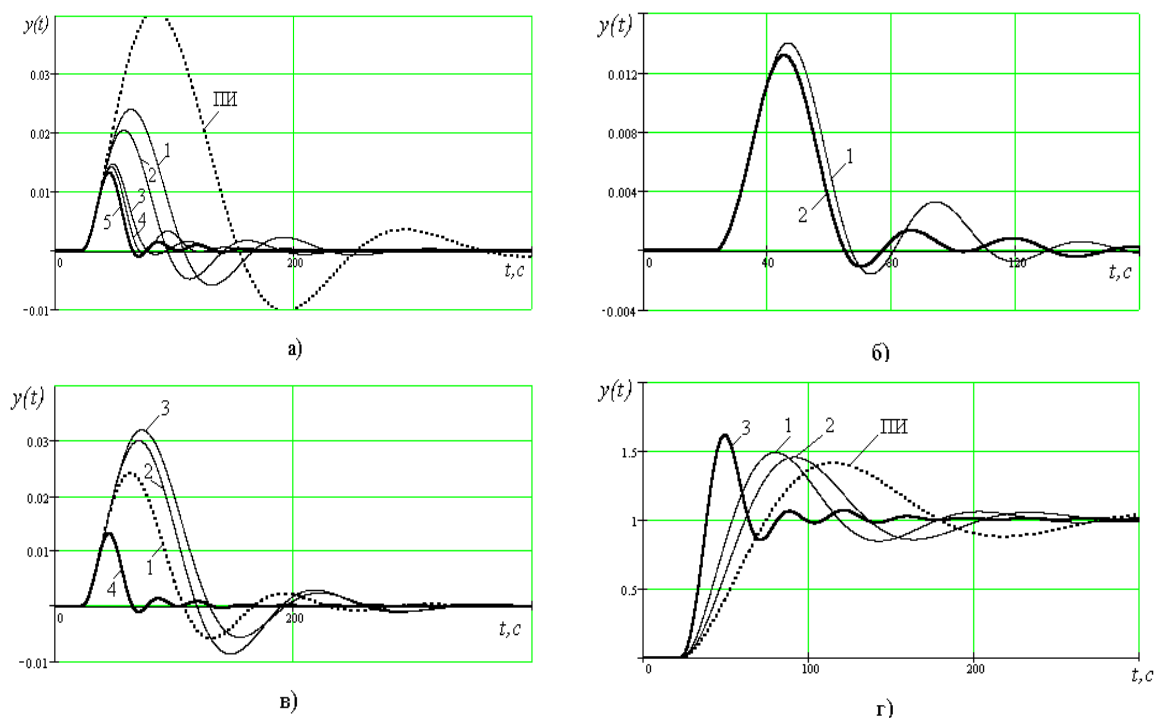


Рис. 4. Переходные процессы

а) – итерационная настройка по эквивалентным объектам (1- исходный процесс; 2 - на 15-м шаге; 3- на 18-м шаге; 4- на заключительном шаге; 5 – переходный процесс при настройках по АДМ; ПИ – переходный процесс в одноконтурной АСР с ПИ-регулятором);

б) – переходные процессы при усредненной итерационной настройке (1) и по алгоритму деформируемого многогранника (2);

в) – 1, 2, 3 - переходные процессы, принятые в качестве начальных при настройке по АДМ (1 – исходная настройка дифференциатора по $W_{\mu y}(p)/W_{\mu z}(p)$; 2 – исходная настройка дифференциатора $k_d = 1.069$, $T_d = 9.327$ [3]; 3 – исходная настройка дифференциатора $k_d = 1$, $T_d = 20$ [3]); 4 – при усредненной настройке по АДМ;

г) – переходные процессы по управляющему воздействию (1 – при настройке дифференциатора по $W_{\mu y}(p)/W_{\mu z}(p)$; 2 – при настройке дифференциатора $k_d = 1.069$, $T_d = 9.327$ [3]; 3 – при усредненной настройке по АДМ; ПИ – для одноконтурной АСР с ПИ-регулятором)

Вид переходных характеристик дифференциатора и регулятора, а также соответствующих эквивалентной каскадной структуре корректирующего и стабилизирующего регуляторов при исходных настройках, усредненных настройках по АДМ и промежуточной итерационной настройке показан на рис.5. Простой визуальный анализ позволяет проследить тенденцию изменения приведенных характеристик.

Как показали предварительные исследования, АСР с дифференциатором при настройках дифференциатора $W_d(p)$ по $W_{\mu y}(p)/W_{\mu z}(p)$ и регулятора $W_p(p)$ по $W_{\mu y}(p) + W_{\mu z}(p) \cdot W_d(p)$ является устойчивой и робастной.

Алгоритм деформируемого многогранника и итерационная настройка, уточняющая параметры дифференциатора и регулятора по эквивалентным объектам, приводят в область настроечных параметров, расположенную в интервале более высоких частот. Это наряду со значительным повышением качества регулирования приводит к повышению чувствительности в случае изменения параметров объекта.

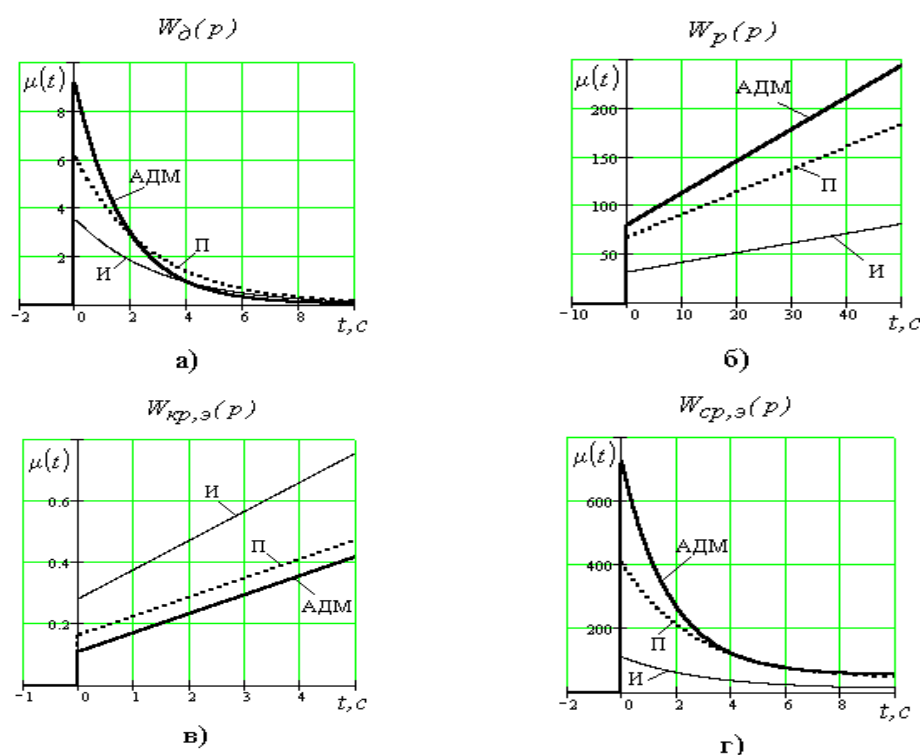


Рис. 5. Переходные характеристики

а) – дифференциатор; б) - регулятор (ПИ- алгоритм); в) - эквивалентный корректирующий регулятор (ПИ – алгоритм); г) - эквивалентный стабилизирующий регулятор (ИД-звено); (И- исходная настройка дифференциатора по $W_{\mu y}(p)/W_{\mu z}(p)$; П- промежуточный шаг итерационной настройки; АДМ – оптимальная настройка).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение АДМ в рассматриваемом численном примере позволяет получить настройки, обеспечивающие при соблюдении заданного запаса устойчивости ($m=0.366$; $\psi_y=0.9$) уменьшение линейного интегрального критерия $I_{л.у}$ по сравнению с одноконтурной АСР с ПИ-регулятором в 8.4 раза и интегрального критерия по модулю $I_{м.у}$ в 11.9 раз; Обычная настройка без итераций, по рекомендациям [1,2,4] обеспечивает уменьшение интегралов, соответственно, в 4 и 2.7 раза; настройка по алгоритму [3] в 3 и 1.8 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. М.: Энергоатомиздат, 1985.

2. **Ротач В.Я.** Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. М.: Энергия, 1973.
3. **Панько М.А., Харахорин Д.А.** Расчет оптимальных настроек регулятора в автоматической системе регулирования с сигналом по производной // Теория и практика построения и функционирования АСУТП. М.: Издательство МЭИ, 1998. С. 61-69.
4. **Ротач В.Я.** Расчет настройки промышленных систем регулирования. М.: Госэнергоиздат, 1961.
5. **Сабанин В.Р., Смирнов Н.И.** Расчеты автоматических систем регулирования в теплоэнергетике. М.: Издательство МЭИ, 2002.